

令和元年6月11日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05043

研究課題名(和文) 抵抗スポット溶接時に生じる電流-熱-接触変形-マイクロ接触多重連成メカニズムの解明

研究課題名(英文) Cycles of triply coupled mechanical contact, current, and thermal conduction phenomena during resistance spot welding

研究代表者

堀江 知義 (Horie, Tomoyoshi)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：40229224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：抵抗スポット溶接中に生じている電流、熱、接触変形、弾塑性変形、接触電気抵抗、接触熱抵抗などの物理現象がマイクロな効果も含めて相互に影響を及ぼしあう、多重連成現象の定量的に評価した。それらの連成効果を電流-熱-接触変形-マイクロ接触電気抵抗連成解析コードと比較することにより、この連成現象の支配因子を特定し、さらに、異なる溶接条件における支配因子を決定し、抵抗スポット溶接のメカニズムを解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

抵抗スポット溶接技術は産業界に広く普及している技術であるが、その内部で生じている連成のメカニズムは複雑で、不明であった。先進的な計算力学技術を導入して、抵抗スポット溶接時に生じる多重連成現象の特性、メカニズムが明らかになり、従来は現場の経験に基づき行われていた条件設定は合理的に行えるようになり、飛躍的な技術革新が期待できる。また、多重連成コードの必要性、及び検証の方向性を示し、この分野で世界をリードした。

研究成果の概要(英文)：The characteristics of the cycles of coupled phenomena that occur among elastic-plastic contact deformation, current distribution, heat generation, and thermal conduction during resistance spot welding are examined using coupled finite element analyses. The current density peak that appears at the center of the interface moves outward along the interface to the high-contact resistance region, then the peaks in the current density, contact resistance, Joule heat generation, and temperature migrate outward with the contact edge followed by the melting zone during the welding process. The influence of welding parameters on the cycles of coupled phenomena is also examined.

研究分野：計算力学

キーワード：抵抗スポット溶接 電流・熱・構造3連成現象 連星のサイクル 接合のメカニズム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究は、抵抗スポット溶接中に生じている電流、熱、接触変形、弾塑性変形、接触電気抵抗、接触熱抵抗などの物理現象がミクロな効果も含めて相互に影響を及ぼしあう、多重連成現象の定量的な評価を行い、連成CAEの開発に資するものである。

抵抗スポット溶接技術(図1)は自動車産業をはじめ広く産業界で利用されている。シミュレーションに関する研究は理論あるいは実験に基づく接触電気抵抗モデルの開発^{1,2)}、FEM連成シミュレーションによる溶接品質評価^{3,4)}、商用解析コード⁵⁾による溶接条件設定への利用などが行われている。

しかし、電流、熱、構造のマクロな接触変形、ミクロな現象である接触電気抵抗などの複数の現象が同時に連成する際に生じる、多数の連成効果や複数の連成サイクルの影響度や条件依存性などの諸特性の定量的評価、連成効果の扱い方と精度の関係などについて、体系的な研究はほとんど行われていない。

文献

- 1) J. A. Greenwood, Temperatures in spot welding, British welding Journal, 8, 316, 1961.
- 2) S. S. Babu, et al., Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals, Science and Technology of Welding and Joining, 6, 126, 2001.
- 3) H. Eisazadeh, et al., New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method, Materials & Design, 31, 149, 2010.
- 4) N. Ma, et al., Numerical and experimental study on nugget formation in resistance spot welding for three pieces of high strength steel sheets, J. of Materials Processing Technology, 210, 2045, 2010.
- 5) SORPAS, <http://www.swantec.com/>.

2. 研究の目的

この連成現象の特徴は、電流値、電流分布に対して接触抵抗の影響が大きい、接触端部に電流集中が生じる、物性値の温度依存性が大きい、そして、温度分布に関しては常温から融点まで温度範囲が広く、分布に偏りが大きいことである。さらに、構造、接触に関しては、最低3か所ある接触部の影響が大きい、電極の形状や当たり方の影響が大きい、変形の影響が大きいことである。電流値を上げて温度が変化したとき、9通りの経路(後述)からなる連成効果が温度分布にどの様に作用するか、容易に予測できない。

(1) これらの連成効果の強さ(影響度)には大小があり、溶接時の条件によりその影響度も変化する。電流-熱-接触変形-接触電気抵抗マルチスケール解析により、個々の連成効果の影響度を評価し、パラメータへの依存性、条件ごとにどの連成効果サイクルが支配的となるかなどの特性を評価し、連成のメカニズムを明らかにする。

(2) 実験との比較による検証には、ナゲット形状、表面温度分布時刻歴、変形時刻歴などに限られるが、それぞれの連成効果サイクルが支配的となる条件を連成解析をもとに設定して比較・検証する。さらに、多重連成マルチスケール解析を行う際に、条件に応じてどのモデル、どの物性データが重要であるか、体系的に示す。

3. 研究の方法

(1) 抵抗スポット溶接の3連成現象

図2に抵抗スポット溶接時に生じる構造・電流・熱3連成現象の概要を示す。この連成現象は主に電極および鋼板の接触変形、接触電気抵抗および母材電気抵抗と電流によるジュール発熱、物性値の温度依存性により生じる。

構造に関しては、接触域および接触圧の変化が大きく、接触域は電流経路および熱伝導経路に影響し、また、接触圧は接触電気抵抗に影響する。電流に関しては、溶接中に母材電気抵抗および接触電気抵抗によって、大きくジュール発熱が生じる。熱に関しては、温度が常温から融点まで大きく変化するため物性値の変化が大きい。このため、抵抗スポット溶接解析ではこれらの強い連成効果を考慮する必要がある。

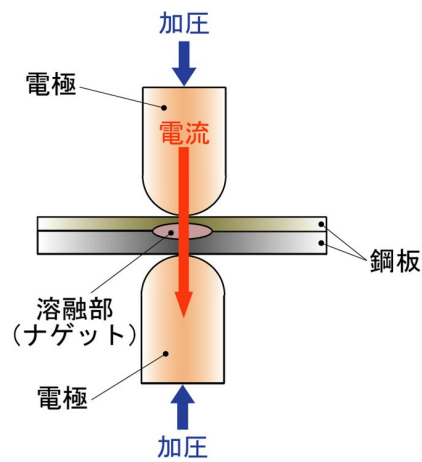


図1 抵抗スポット溶接
図1 抵抗スポット溶接

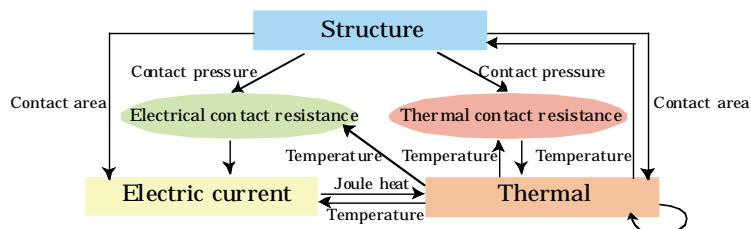


図2 抵抗スポット溶接時の構造・電流・熱3連成現象

(2) 連成解析モデル

構造解析では熱弾塑性接触，大変形，大ひずみを考慮する．また，物性値の温度依存性を考慮する．電流解析では電気抵抗率の温度依存性を考慮する．また，接触電気抵抗の加圧力・温度依存性を Babu らのモデル⁶⁾より考慮する．熱伝導解析ではジュール発熱，物性値の温度依存性，接触熱抵抗を考慮する⁷⁾．本研究では，これらの解析を組み合わせた構造・電流・熱伝導 3 連成解析を行う．

文献

6) S. S. Babu, et al., Science and Technology of Welding and Joining, 3, (2001), 126-132.

7) 二保 知也, 堀江 知義 他, 溶接学会論文集, 第 33 巻第 3 号, (2015), 271--282.

4. 研究成果

(1) 鋼板間接触面における連成現象の検討

板厚 1.6 mm, 270 MPa 級鋼板の 2 枚重ね抵抗スポット溶接を解析対象とし，溶接電流値は 9.5 kA, 通電時間 267 ms, 加圧力は 2.65 kN とする．また，解析には軸対称性を考慮し，解析対象の初期温度は 20 とする．

溶接初期 2.0 ms および後期 200.0 ms における電流分布，温度分布，ナゲット域(溶融域)を図 3 に示す．同図(a)より，鋼板間接触面および電極/鋼板間接触面の中心付近で発熱が生じている．また，同図(b)において，高温領域が拡大し，ナゲットが生成されている．こうしたナゲットの生成過程における鋼板間接触面の連成現象を検討する．

電流密度分布の変化を図 4 に示す．溶接初期は，接触面の中心で電流密度ピークが見られる．その後，高温となり，電気抵抗が高くなった中心付近を避けるために，電流は外側に移動する．

鋼板間接触面の電流密度，接触電気抵抗，温度およびジュール発熱分布を図 5 に示す．同図(a)では，中心から半径 0.8 mm までの高接触圧・高温領域，半径 0.8 mm から 2.5 mm までの低接触圧・低温の遷移領域，非接触領域の 3 領域に分類できる．接触電気抵抗ピークは遷移領域の接触端部で生じるが，電流密度ピークおよびジュール発熱ピークは遷移領域の内側で生じている．温度分布は高接触圧・高温領域で最も高くなり，これらのピークの外側にある遷移領域で急激に低くなっている．また，時間とともに同図(b)のように，電流密度ピークは接触端部に移動し，高温域が拡大して，ナゲット域が生成されている．また，鋼板間接触面全体が高温になっているため，接触電気抵抗は消滅し，支配的な発熱は母材抵抗発熱のみとなる．以上のように抵抗スポット溶接では，接触電気抵抗発熱から母材抵抗発熱に移行する間に，接触電気抵抗ピーク，電流密度ピークおよびジュール発熱ピークが領域とともに外側に移動して，ナゲット域が生成される．

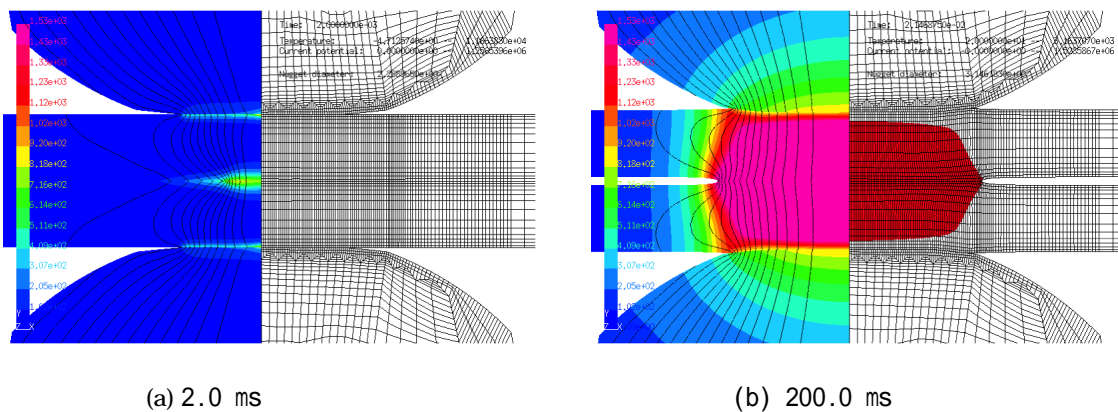


図 3 温度分布及び溶融域

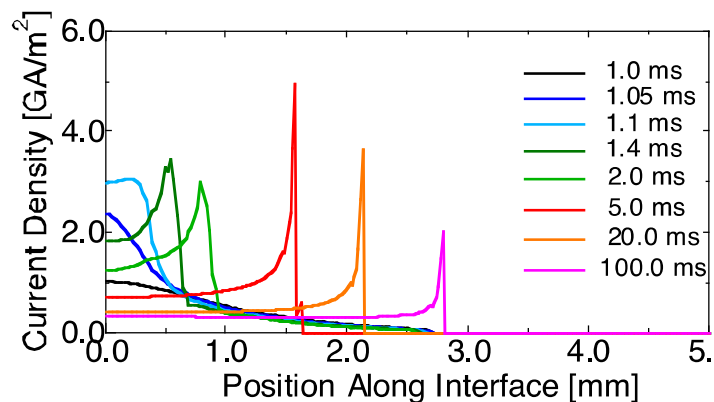
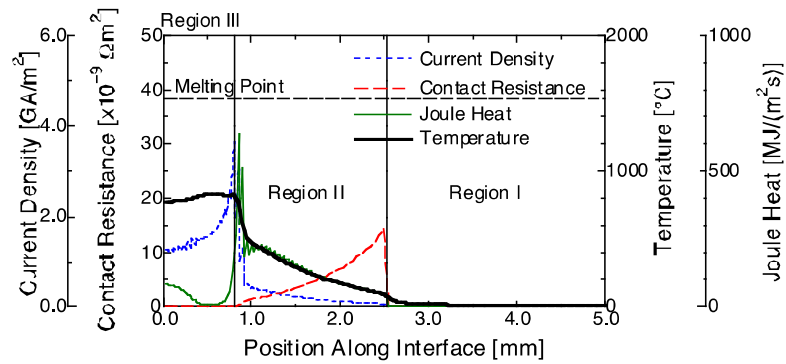
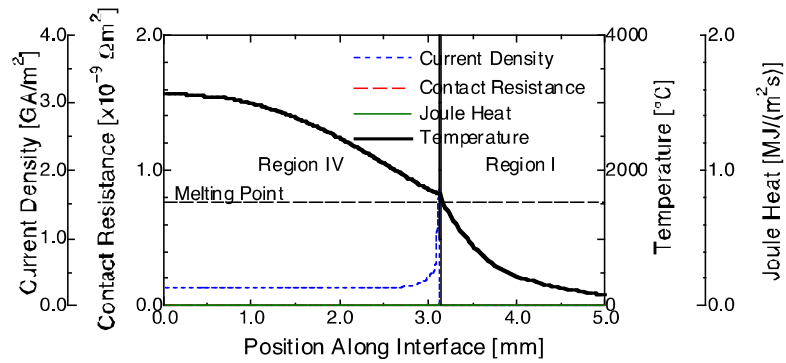


図 4 接触面に沿う電流密度分布の遷移



(a) 2.0 ms



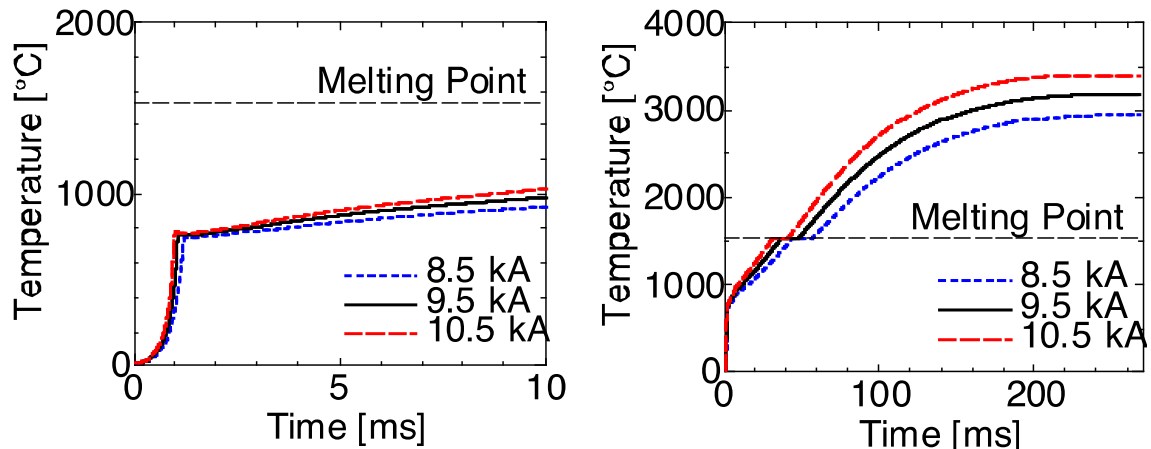
(b) 200.0 ms

図5 接触面に沿う接触抵抗，電流密度，ジュール発熱，温度の分布

(2) 達成現象に及ぼす溶接条件の影響（溶接電流の効果）

溶接電流は重要なパラメータの一つであり，この値が高いとジュール発熱は大きくなり温度がより高くなる．しかし，高温になると鋼板の剛性低下により接触域が拡大するため，電流密度が低くなり発熱が小さくなることも考えられる．ここでは溶接電流値が温度に及ぼす効果を検討する．

溶接電流値を8.5, 9.5, 10.5 kAと変えた時の鋼板間接触面中心軸上における温度時刻歴をF図6に示す．同図(a)に示す溶接初期において，溶接電流値が高いと約1.0 msまでは温度上昇が速いが，その後，全てのケースで温度上昇が小さくなっている．これは温度が約1000以上になるとBabuらのモデルでは接触電気抵抗が消滅して，接触電気抵抗発熱も消滅するためである．同図(b)より，4.0 ms以降は温度差が大きくなっている．これは，溶接電流値が高いほど母材抵抗発熱が大きいためである．このため，高電流では，接触域の拡大による電流密度の低下よりも，母材抵抗発熱の方が温度への影響が大きいといえる．



(a) 0.0 ~ 10.0 ms

(b) 0.0 ~ 267.0 ms

図6 接触面に沿う電流密度分布に溶接電流が及ぼす効果

(3) 連成現象に及ぼす溶接条件の影響（加圧力の効果）

加圧力も重要なパラメータの1つであり、この値が高いと接触域が拡大して、電流密度が小さくなるため、ジュール発熱は小さくなると考えられる。しかし、接触圧が高くなると接触電気抵抗は低くなり、電流密度が高くなるため、ジュール発熱は大きくなることも考えられる。ここでは加圧力が電流および温度に及ぼす効果を検討する。

加圧力を2.3, 2.65, 3.0 kNと変えた時の48.0 ms時における鋼板間接触面の電流密度および温度分布を図7に示す。加圧力が高いと接触域が拡大して電流密度のピークが外側に移動するため、同図(a)に示すように接触面の電流密度はわずかに低くなる。また、接触面のジュール発熱が小さくなり、同図(b)に示すように温度が低くなっている。このため、高加圧力では、接触電気抵抗の消滅による電流密度の上昇よりも、接触域の拡大による電流密度の低下の方が温度への影響が大きいといえる。

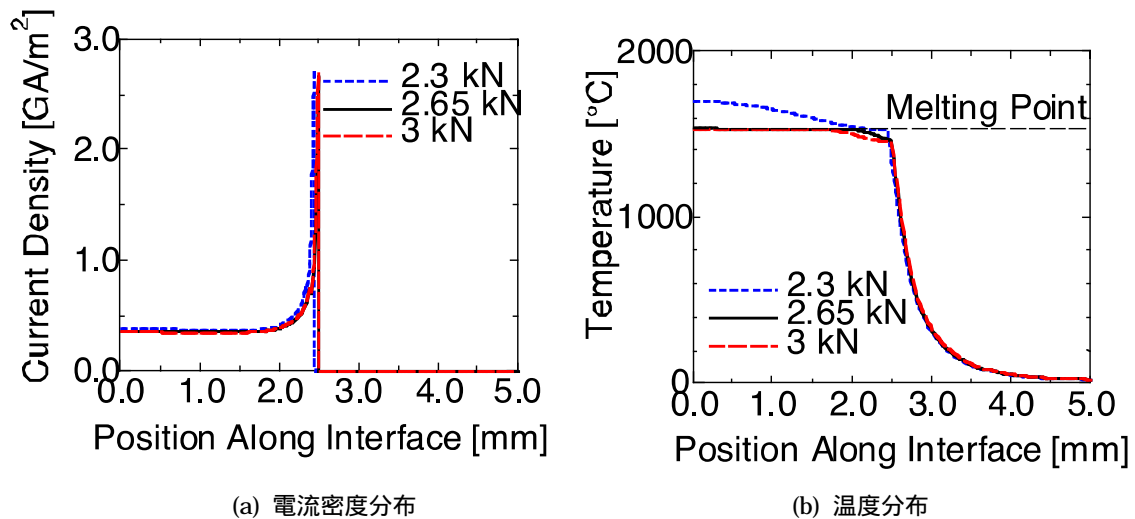


図7 接触面に沿う電流密度、温度分布に加圧力が及ぼす効果（48 ms）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

- (1) Horie Tomoyoshi, Niho Tomoya, Hayashi Naoki, Ishihara Daisuke, Cycles of triply coupled mechanical contact, current, and thermal conduction phenomena during resistance spot welding, *Welding in the World*, 査読有, 63, 2019, 701-713, 10.1007/s40194-018-00699-5
- (2) Tomoyoshi Horie, Tomoya Niho, Daisuke Ishihara, Coupled Finite Element Analysis Approach Combining In-house and General-purpose FEM Codes, *IUTAM Symposium on Solver-Coupling and Co-Simulation*, 査読有, *Procedia IUTAM*, 2019, 1-7, 10.1007/978-3-030-14883-6_7
- (3) 二保 知也、堀江 知義、池上 恭平、石原 大輔、松永 賢一、朱 徳林、3枚重ね抵抗スポット溶接の鋼板間接触面に生じる弾塑性接触変形・電流・熱伝導3連成現象の比較・検討、*溶接学会論文集*, 査読有, 35, 2017, 63-72, 10.2207/qjws.35.63
- (4) Tomoya Niho, Tomoyoshi Horie, Junpei Uefuji and Daisuke Ishihara, Stability analysis and evaluation of staggered coupled analysis methods for electromagnetic and structural coupled Finite element analysis, *Computers & Structures*, 査読有, Vol. 178, (2017), pp. 129-142, 10.1016/j.compstruc.2016.09.003

〔学会発表〕(計 14 件)

- (1) Tomoya NIHO, Hiroyuki KURAMAE, Daisuke ISHIHARA, Tomoyoshi HORIE, Coupled Finite Element Analysis Model of Structural and Electrical Coupled Analysis for Electrical Contact Resistance, *The 13th World Congress in Computational Mechanics (WCCM 2018)*, 査読無, 2018.
- (2) Niho T, Kubota K, Aramaki H, Kuramae H, Ishihara D, Horie T, Microscale electrical contact resistance analysis for resistance spot welding, *Proceedings of the 7th International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2017*, 査読無, 2017.
- (3) Tomoyoshi Horie, Tomoya Niho, Daisuke Ishihara, Coupled Finite Element Analysis Framework Combining Inhouse and General-purpose FEM Codes, *IUTAM Symposium on Co-Simulation and Solver-Coupling*, 査読無, 2017.
- (4) Hiroyuki Kuramae, Tomoya Niho, Riku Kusumoto, Jyunya Yamada, Tomoyoshi Horie, Multiscale Finite element multiphysics analysis of resistance spot welding, *Proceedings of 10th International*

conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society, 査読無, (2016), pp. 333-336.

- (5) Tomoyoshi Horie, Tomoya Niho, Naoki Hayashi, Daisuke Ishihara, Mechanisms of elasto-plastic contact, electric current and thermal conduction triply coupled phenomena during resistance spot welding, Proceedings of 10th International conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society, 査読無, (2016), pp. 329-332.
- (6) Tomoya Niho, Tomoyoshi Horie, Junpei Uefuji and Daisuke Ishihara, Numerical instability of staggered electromagnetic and structural coupled analysis using time integration method with numerical damping, Proceedings of the International Conference on Computational Methods, 査読無, Vol.3, Paper ID 1962, (2016), 8 pages.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-solid.mse.kyutech.ac.jp>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：二保知也

ローマ字氏名：(NIHO, Tomoya)

研究協力者氏名：石原大輔

ローマ字氏名：(ISHIHARA, Daisuke)

研究協力者氏名：倉前宏行

ローマ字氏名：(KURAMAE, Hiroyuki)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。